

文章编号: 1007-6735(2017)06-0549-07

DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.2017.06.008

基于能力约束的地震灾害应急救援调度优化研究

潘新超, 刘勤明, 叶春明

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 研究了能力约束下的地震灾害应急救援的调度优化. 首先, 针对应急救援时医院能同时救治伤员的容量以及从灾害点到医院运输伤员的能力有限的问题, 分别从单灾害点多医院和多灾害点多医院两方面来建立调度优化模型, 模拟伤员运输; 其次, 考虑救援期间伤员的流动所导致的医院救治能力的动态性, 重新规划调度优化模型, 用最短的时间救治更多的伤员; 最后, 通过一个算例的计算分析对模型进行说明.

关键词: 应急救援; 能力约束; 地震灾害; 仿真分析; 伤员流动

中图分类号: C 935

文献标志码: A

Capacity-Constrained Emergency Rescue After Earthquake Disaster

PAN Xinchao, LIU Qinming, YE Chunming

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The dispatch of emergency rescue after earthquake disaster shows great effects on the successful rescue after earthquake and the effective distribution of ability. In the first place, in the rescue, the capacity of hospital to cure and the ability that wounded were transported from the disaster point to the hospital were limited. The models of single disaster point multiple hospitals and multiple disaster point multiple hospitals were established respectively to simulate the transport. In the second place, the dynamic numbers of wounded that hospital could treat which was resulted by the flow of wounded were considered for better planning the model of dispatch, so that it's possible to use the shortest time to rescue more wounded. The model was explained through the calculation of an example.

Keywords: emergency rescue; capacity constraint; earthquake disaster; simulation analysis; flowing of wounded

收稿日期: 2017-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71471116 和 71271138); 教育部人文社会科学研究青年基金资助项目(15YJCZH096); 上海理工大学国家级项目培育基金资助项目(16HJPYQN02); 上海理工大学博士启动基金资助项目(BSQD2014038).

第一作者: 潘新超(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 应急资源配置. E-mail: pxinchao1004@163.com

通信作者: 刘勤明(1984-), 男, 副教授, 研究方向: 维护调度、人工智能等. E-mail: lqm0531@163.com

地震作为人类面临的一种主要自然灾害,给人类的生命、财产安全带来了极大的威胁,对地震灾害等突发事件的应急救援调度研究尤为重要.应急救援调度优化是研究如何合理地安排灾后救援活动及配置医院能力,确保地震等灾害应急救援的有序进行以及救援目标的实现.

关于突发事件应急管理的研究引起了国内外学者的关注^[1-3].突发事件发生后,需要尽快将伤员运输至救治点进行救治,以尽可能地减少人员的伤亡.在突发事件中,车辆调度的目标是使救援中心需求在请求的时间里满足最大化,车辆调度模型分解为2个多资源的网络问题,基于此,文献^[4-5]作了相关研究.在应对单灾害点物资调度方面,Fiedrich等^[6]探讨了在时间、资源数量和质量有限的情况下,通过资源的有效使用来提高救援的质量,使死亡人数最小,给出了地震后向多个受灾地点分配和运输资源的最优计划模型.Jae^[7]研究了不确定情况下如何分配有限的车辆资源将受伤人员运输到医院,目标是使受伤人员存活数最大.在运用某种交通运输方式进行救援方面,Barbarosoglu等^[8]提出了一种分层多标准方法解决直升机在救灾中的调度问题,使派遣的直升机和飞行员数目在满足需求下成本最低.应急救援刻不容缓,Jagtenberg等^[9]提出了一个基准模型(简称离线模型)以计算出最佳调度决策.Wilmer等^[10]证明了救护飞机调度系统的有效性,并对伤员的受伤程度作了研究.Clark等^[11]提出了一个数学转运多商品供应链网络模型,用于人道主义救援行动.Knight等^[12]针对救护车调度问题建立了预期患者存活率函数.国内也有许多学者建立了应急资源调度方面的模型并设计了求解算法.刘春林等^[13]从非路径角度分两种情况讨论多出救点组合优化方案的求取问题.潘郁等^[14]以连续性消耗应急过程为背景,运用粒子群算法求解多目标的应急资源调度数学模型.杨继君等^[15]从多灾点所需应急资源的角度出发,提出了基于非合作博弈的应急资源调度模型和算法.曹庆奎等^[16]以最小化系统总成本为目标建立带时间窗的车辆调度机会约束规划模型,并提出求解该问题的模拟植物生长算法.代颖等^[17]以应急系统中各资源需求点的应急救援时间满意度之和最大及系统总成本最小为目标,建立了一个多目标定位-路径问题(LRP)模型,并提出了一种混合多目标遗传算法.对于多储备点、多发放点和多种救援物资分配和调度问题,张国富等^[18]构建了多储备点同时响应多发放点的多种救援物资并行分配模型,并设计了一种

应急救援物资多目标并行分配算法进行求解.

但是,这些关于突发应急的文献很少考虑将伤员运至医院后接受救治并随时间流动而造成医院容量动态变化的情况.本文将医院伤员因救治与运输的时间差而产生的流动性考虑到应急救援调度模型中,实时计算医院的实际可救治伤员数,从而提高医院的利用率,尽可能地降低伤员等待救治的时间.地震发生后形成单一灾害点,但受灾区域伴随时间变化逐步发展为多个灾害点,所以,本文分别从单灾害点多医院和多灾害点多医院两个方面建立伤员应急救援调度模型,并通过算例验证模型算法的可行性.并且,在受灾区域,能提供运输伤员的总车辆数是有限制的,且由于伤员的受伤状态和灾区各道路所遭到的不同程度的破坏,不同受灾点到不同医院的运输能力也受到限制,因此,要最大化地提高车辆的利用率,尽早地将所有伤员运至医院进行救治,就要尽可能地减少车辆的等待时间,让救援车辆一直处于往返在各受灾点和各医院的行驶状态,所以,在车辆完成一次调度时,立即根据不同灾害点到不同医院的运输时间及医院容量进行调度.

1 单灾害点多医院应急救援调度优化

单灾害点多医院的应急救援模型在实际的应用中相对较少,但在地震初发到之后的某段时间内,灾害点单一,该段时间内开展单灾害点多医院的救援.与此同时,单灾害点救援模型不论是在实际救援中还是在模型构建中都是多灾害点救援模型的基础,因此,单灾害点救援模型有利于全面阐述地震发生时的救援策略,且能对多灾害点救援模型进行有效过渡.

单灾害点多医院的救援模型将伤员以最短的时间运至医院进行救治作为第一优先级的约束.灾害点A处的运输能力受限,每次只能选择运往一所医院,返回灾害点后再根据各医院的救治能力和到各医院的运输时间选择运往另一所医院.在本文的研究中,不考虑伤员从灾害点到医院的运输成本,并假定在每一次的伤员调度中,都能有满足容量要求的医院对伤员进行救治.

1.1 调度优化模型构建

现对单灾害点模型符号进行说明.

A:地震灾害点;

X:灾害点A的伤员总数;

G:灾害点的单次运输能力;

B_j :编号为j的医院, $j=1,2,\dots,n$;

Y_j : 编号为 j 医院能够同时作业最大容量, $j = 1, 2, \dots, n$;

W_j : 编号为 j 的医院的实际可用容量, $j = 1, 2, \dots, n$;

v_j : 编号为 j 的医院的伤员流动速度, $j = 1, 2, \dots, n$;

t_j : 灾害点 A 到救治点 B_j 的单程运输时间, $j = 1, 2, \dots, n$;

t_{kj} : 应急点 A 第 k 次调运的单程时间, 运往的医院是 $B_j, j = 1, 2, \dots, n$;

N : 灾害点 A 需要调运的次数;

r_{kj} : 灾害点 A 第 k 次调运的实际调运人数, 运往的医院是 $B_j, j = 1, 2, \dots, n$.

Φ : 伤员全部运至医院所采取的方案.

Z : 整数集.

假设: 至少存在 1 个 B_j 使得 $r_{kj} \leq W_j$, 意为 A 在进行第 k 次调运时一定会有满足容量的 B_j 供 A 调运.

$$\min T(\Phi) = 2 \sum_{k=1}^{N-1} t_{kj} + t_{Nj} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } N = \frac{X}{G} = \begin{cases} \frac{X}{G}, \frac{X}{G} \in Z, N > 0 \\ \left\lceil \frac{X}{G} \right\rceil, \frac{X}{G} \notin Z, N > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$G = \min \{X, G\} \quad (3)$$

$$r_{kj} \leq W_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$r_{kj} \leq G \quad (5)$$

式(1)为目标函数, 表示将灾害点的所有批次的伤员全部运送至医院的最短时间, 前 $N-1$ 次调运

$$W_f = \begin{cases} W_f - r_{(k-1)f} + v_f t_f = \begin{cases} W_f - r_{(k-1)f} + v_f t_f, W_f - r_{(k-1)f} + v_f t_f \leq Y_f, f \neq e \\ Y_f, W_f - r_{(k-1)f} + v_f t_f > Y_f, f \neq e \end{cases} \\ W_f - r_{(k-1)f} + 2v_f t_f = \begin{cases} W_f - r_{(k-1)f} + 2v_f t_f, W_f - r_{(k-1)f} + 2v_f t_f \leq Y_f, f = e \\ Y_f, W_f - r_{(k-1)f} + 2v_f t_f > Y_f, f = e \end{cases} \end{cases}$$

步骤 4 用步骤 1 的方法完成第 k 次调度, 转入步骤 3.

2 多灾害点多医院应急救援调度优化

地震发生后灾区随着时间的变化, 单灾害点逐渐演化成多灾害点, 因此, 在地震发生后的伤员调度中所用到的模型绝大多数是多灾害点多医院的调度模型, 该模型的构建虽然较为复杂但具有很强的实际意义. 并且在以往的文献中很少有对地震发生时伤员运输的研究, 关于地震灾害的研究多集中在救援物资的运输上, 多灾害点多医院的救援调度模型

都有来回, 最后一次运输到达医院后即结束调运; 式

(2) 为灾害点 A 需要调运的次数, 其中, $\left\lceil \frac{X}{G} \right\rceil$ 表示对

$\frac{X}{G}$ 进行向上取整运算; 式(3)表示实际运输能力不高于伤员总数; 式(4)表示往 j 医院调运的人数小于 j 医院的实际可用容量; 式(5)表示灾害点往医院调运的实际人数小于灾害点的运输能力.

1.2 优化模型求解

现介绍模型求解步骤.

步骤 1 在所有的 $t_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 中选择最小的 t_e , 若 $G \leq W_e$ (此时 $W_e = Y_e$), 则选择 B_e 对 A 进行调度. 若 $t_e = t_{e'}$, 则对 $\max(r_{ke}, r_{ke'})$ 所对应的 B_e 对 A 进行调度. 若 $G > W_e$ (此时 $W_e = Y_e$), 则忽略掉该 t_e , 选择次小的 t_e , 重复该步骤, 直到在剩余的 t_j 中选出满足 $G \leq W_e$ 的 t_e , 选择 B_e 完成对 A 的调度. 赋值 $k = k + 1$. t_e 表示灾害点 A 到救治点 B_e 单程运输时间. $e, e' \in \{j | j = 1, 2, \dots, n\}$. $t_{e'}$ 表示灾害点 A 到救治点 $B_{e'}$ 单程运输时间; $r_{ke'}$ 表示应急点 A 到救治点 $B_{e'}$ 的单程运输时间.

步骤 2 若 $k > N$, 则停止调度; 否则, 步骤继续进行. 车辆返回灾害点时, 各医院的容量为 $W_1 = Y_1, W_2 = Y_2, \dots, W_e = Y_e - r_{1e} + v_e t_{1e}, W_{e+1} = Y_{e+1}, \dots, W_n = Y_n$, 用步骤 1 的方法再度对 A 进行调度, 假设选择 B_f 完成对 A 的调度. 赋值 $k = k + 1$.

步骤 3 若 $k > N$, 则停止调度; 否则, 步骤 1 继续进行. 车辆返回灾害点时, 各医院的容量为

在一定程度上填补了当前文献的空白, 对地震灾害伤员的调度起着一定的理论指导意义.

多灾害点多医院的救援同样以最短的伤员运输时间作为第一优先级的约束, 较单灾害点而言, 多灾害点救援问题较为复杂. 图 1 (见下页) 是一个多灾害点多医院伤员调运示意图, 图中有 4 个灾害点和 3 所医院, 在开始时 (0 时刻) 4 个灾害点根据医院容量要求及从灾害点到医院的运输时间进行第一次的救援调度, 车辆最早返回的灾害点立即进行下一次的救援调度, 模型直至所有的灾害点的伤员全部运至医院方能结束. 在本文的研究中, 不考虑伤员从灾害点到医院的运输成本, 并假设在每一次的伤员

调度中,都能有满足容量要求的医院对伤员就行救治.

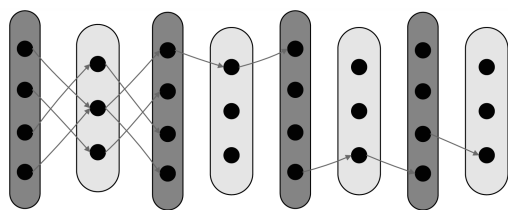


图1 多灾害点多医院调度模型图

Fig.1 Model of multiple disaster points multiple hospitals

2.1 调度模型构建

现对单灾害点模型符号进行说明.

A_i : 标号为 i 的地震灾害点, $i = 1, 2, \dots, m$;

X_i : 各个应急点需要救治人数, $i = 1, 2, \dots, m$;

G_i : 突发点 A_i 处的运输能力, $i = 1, 2, \dots, m$;

B_j : 标号为 j 的医院, $j = 1, 2, \dots, n$;

Y_j : 医院能够同时作业的最大容量, $j = 1, 2, \dots, n$;

W_j : 医院 B_j 的实际可用容量, $j = 1, 2, \dots, n$;

v_j : 医院 B_j 的伤员流动速度, $j = 1, 2, \dots, n$;

N_i : 第 i 个灾害点需调运的次数, $i = 1, 2, \dots, m$;

t_{ij} : 灾害点 A_i 到医院 B_j 的单程运输时间; $i = 1, 2, \dots, m$

t_{ikj} : 灾害点 A_i 第 k 次往医院 B_j 调运的单程时间; $i = 1, 2, \dots, m$

r_{ikj} : A_i 第 k 次往 B_j 调运的人数, $j = 1, 2, \dots, n$;

T_{i_k} : 灾害点 A_i 第 k 次调运完返回后的最早时刻 ($i_k \leq N_i$), 当 $i_k = N_i$ 时, A_i 不再参与调度.

Φ_i : 灾害点 i 的伤员全部运至医院所采取的方案.

假设: 至少存在 1 个 B_j 使得 $r_{i_k} \leq W_j$, 意为 A_i 在进行第 k 次调运时一定会有满足容量的 B_j 供 A_i 调运.

$$\min T(\Phi_i) = 2 \sum_{k=1}^{N_i-1} t_{i_k j} + t_{i_{N_i} j} \quad (6)$$

$$\min T = \max \min T(\Phi_i) \quad (7)$$

$$\text{s. t. } N_i = \frac{x_i}{G_i} = \begin{cases} \frac{X_i}{G_i}, \frac{X_i}{G_i} \in Z, N_i > 0 \\ \lceil \frac{X_i}{G_i} \rceil, \frac{X_i}{G_i} \notin Z, N_i > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$G_i = \min \{G_i, X_i\} \quad G_i > 0 \quad (9)$$

$$r_{i_k j} \leq W_j, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$r_{i_k j} \leq G_i \quad (11)$$

式(6)表示灾害点 A_i 的最短运输时间, 其计算方式同式(1)相同; 式(7)表示所有灾害点全部伤员都被运输完的最短时间, 式(7)中共给出了 m 种结果, 在这 m 个时间结果中, 只有最后 1 个灾害点的伤员全部运输完, 整个调度系统才能结束; 式(8)中 $\lceil \frac{X_i}{G_i} \rceil$ 表示向上取整; 式(9)表示实际运输能力不高于伤员总数; 式(10)表示往 j 医院单次运输的人数小于其实际可用容量; 式(11)表示灾害点的实际运输人数小于该灾害点的运输能力.

2.2 优化模型求解

现介绍模型求解步骤.

步骤 1 未开始调度时, $T_{i_0} = 0$ ($i = 1, 2, \dots, m$). 在所有的 t_{ij} 中选取最小的 t_{ef} , 若 $G_e \leq Y_f$, 则对 A_e 进行调运, 若 $t_{ef} = t_{e'f'}$ 则对 $\max(r_{e_k f}, r_{e'_{k'} f'})$ 所对应的 A_e 进行调度, 若 $G_e > Y_f$, 则忽略该 t_{ef} , 选择次小的 t_{ef} , 重复该步骤, 直到在剩余的 t_{ij} 中选出满足 $G_e \leq Y_f$ 的 t_{ef} , 完成 A_e 的调度. T_{i_0} 表示灾害点 A_i 第 0 次调运完返回后的最早时刻 $e \in \{i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$, $f \in \{j \mid j = 1, 2, \dots, n\}$, t_{ef} 表示灾害点 A_e 到医院 B_f 的单程运输时间, $t_{e'f'}$ 表示灾害点 $A_{e'}$ 到医院 $B_{f'}$ 的单程运输时间.

步骤 2 重新计算各救治点 $B_1, B_2, \dots, B_n$, 容量分别为 $Y_1, Y_2, \dots, Y_f - G_e, Y_n$, 不再考虑步骤 1 已完成调度的 A_e , 对剩余的地震灾害点 A_i ($i = 1, 2, \dots, m, i \neq e$) 用步骤 1 的方法完成第一轮调运. 运输后各救治点容量

$$W_j = Y_j - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n r_{i_k j}$$

步骤 3 第一轮调运完后各车辆均返回灾害点时的时刻为 T_{i_1} , 从 T_{i_1} 中选出最小值 T_{h_1} , 到 T_{h_1} 时, 各救治点的救治时间

$$q_j = \begin{cases} T_{h_1} - t_{i_1 j}, & T_{h_1} - t_{i_1 j} > 0 \\ 0, & T_{h_1} - t_{i_1 j} \leq 0 \end{cases}$$

此时, 各救治点 $B_1, B_2, \dots, B_n$ 容量为

$$W_j = \begin{cases} W_j + v_j q_j, & W_j + v_j q_j \leq Y_j \\ Y_j, & W_j + v_j q_j > Y_j \end{cases}$$

对 T_{h_1} 所对应的 A_h 用步骤 1 的方法进行调度.

步骤 4 调运后计算并重置该时刻各救治点容量

$$W_j = W_j - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n r_{i_k j}$$

此时仅有上轮发生调度的灾害点的容量发生了变化,即未产生调度的灾害点不进行此式的计算,得到新的一组 T_{i_k} ,进入步骤5.

步骤5 在 m 个 T_{i_k} 中选出最小的 T'_{i_k} ,若 $i_k = N_i$,则 $m = m - 1$.若 $m = 0$,则结束调运;若 $m > 0$,则重新计算各救治点 $B_1, B_2, \dots, B_n$ 容量

$$W_j = \begin{cases} W_j + V_j (T'_{i_k} - T'_{i'_k}), & W_j + V_j (T'_{i_k} - T'_{i'_k}) \leq Y_j \\ Y_j, & W_j + V_j (T'_{i_k} - T'_{i'_k}) > Y_j \end{cases}$$

式中: T'_{i_k} 表示 m 个 T_{i_k} 中的最小值; $i'_k \in \{i \mid i = 1, 2, \dots, m\}$ $T'_{i'_k}$ 表示上一轮的 m 个 T_{i_k} 中的最小值.

对 T'_{i_k} 所对应的 A_i 用步骤1的方法进行调运,转入步骤4.

3 算例分析

3.1 单灾害点多医院算例

当某一地区发生地震灾害时,在地震发生初时,受灾地区较为集中,可视为单灾害点多医院救援问题.救援中医院容量、伤员流动率、灾害点到各医院的时间、灾害点的伤员总数、运输能力如表1所示.

对表1的数据进行仿真分析,突发应急点A所需运输伤员次数 $N = \lceil \frac{1\ 000}{300} \rceil = 4$,该仿真案例求解过程汇总如表2所示.

3.2 多灾害点多医院算例

地震发生一段时间后,原本受到严重损坏的建

表1 1个地震灾害点3个医院初始数据

Tab.1 Initial data of one earthquake disaster point and three hospitals

v_j	Y_j	t_{ij}	$A (G = 300, X = 1\ 000)$
25	500	B_1	6
20	400	B_2	3
30	420	B_3	5

筑、道路等设施因余震等因素而塌方,单灾害点随着时间的推移逐步发展为多灾害点.假设某地区在地震发生后有4个灾害点需要救援,有3所医院参与应急救援.救援中医院容量 Y_j ,伤员流动率 v_j ,灾害点到各医院的时间 t_{ij} ,灾害点的伤员总数 X_i 及运输能力 G_i 如表3所示.

对表3的数据进行仿真分析,突发事件灾害点 A_1, A_2, A_3, A_4 所需运输伤员次数分别为 $N_1 = 5, N_2 = 4, N_3 = 3, N_4 = 3$,根据模型的求解方法,得出该仿真案例求解结果如表4所示(见下页).

3.3 结果分析

以较为复杂的多灾害点多医院算例为例,计算出不考虑医院内伤员流动情况的救援时间,表5(见下页)的数据中不仅有 B_1, B_2, B_3 这3所医院,另外,还假设了 B_4, B_5, B_6 这3所医院参与应急救援才能完成救援任务.

表2 1个地震灾害点3个医院的算例求解

Tab.2 Solution of the example of one earthquake disaster point and three hospitals

k	W_j	B_j	r_{ij}	t_{ij}
$k=1<4$	$W_1=500; W_2=400; W_3=420$	B_2	$r_{12}=300$	$t_{12}=3$
$k=2<4$	$W_1=500; W_2=160; W_3=420$	B_3	$r_{23}=300$	$t_{23}=5$
$k=3<4$	$W_1=500; W_2=360; W_3=270$	B_2	$r_{32}=300$	$t_{32}=3$
$k=4=4$	$W_1=500; W_2=180; W_3=420$	B_2	$r_{32}=100$	$t_{32}=3$
$k=5>4$	此时灾害点 A 的运输次数为 4, 已经将全部伤员都运至医院, 结束调运.			
$\min T=2\times(t_{12}+t_{23}+t_{32})+t_{33}=25$				

表3 4个地震灾害点3个医院的初始数据

Tab.3 Initial data of four earthquake disaster points and three hospitals

X_i	G_i	A_i	t_{ij}		
			$B_1 (Y_1 = 500, v_1 = 400)$	$B_2 (Y_2 = 400, v_2 = 300)$	$B_3 (Y_3 = 1\ 000, v_3 = 50)$
$X_1 = 1\ 000$	$G_1 = 200$	A_1	4	3	5
$X_2 = 450$	$G_2 = 120$	A_2	8	6	9
$X_3 = 800$	$G_3 = 300$	A_3	5	6	8
$X_4 = 1\ 200$	$G_4 = 400$	A_4	6	4	4

表 4 4 个地震灾害点 3 个医院的算例求解
Tab.4 Solution of the example of four earthquake disaster points and three hospitals

m	T_{i_k}	W_j	r_{ij}
4	$T_{1_0} = 0$	$W_1 = 500; W_2 = 400; W_3 = 1\ 000$	$r_{1_1 2} = 200$
4	$T_{4_0} = 0$	$W_1 = 500; W_2 = 200; W_3 = 1\ 000$	$r_{4_1 3} = 400$
4	$T_{3_0} = 0$	$W_1 = 500; W_2 = 200; W_3 = 1\ 000$	$r_{3_1 1} = 300$
4	$T_{2_0} = 0$	$W_1 = 500; W_2 = 200; W_3 = 1\ 000$	$r_{2_1 2} = 120$
4	$T_{1_1} = 6$	$W_1 = 240; W_2 = 170; W_3 = 700$	$r_{1_2 1} = 200$
4	$T_{4_1} = 8$	$W_1 = 120; W_2 = 230; W_3 = 800$	$r_{4_2 3} = 400$
4	$T_{3_1} = 10$	$W_1 = 200; W_2 = 290; W_3 = 500$	$r_{3_2 3} = 300$
4	$T_{2_1} = 12$	$W_1 = 280; W_2 = 350; W_3 = 300$	$r_{2_2 2} = 120$
4	$T_{1_2} = 14$	$W_1 = 360; W_2 = 290; W_3 = 400$	$r_{1_3 2} = 200$
4	$T_{4_2} = 16$	$W_1 = 440; W_2 = 150; W_3 = 500$	$r_{4_3 3} = 400$
3	$T_{1_3} = 20$	$W_1 = 500; W_2 = 270; W_3 = 300$	$r_{1_4 2} = 200$
3	$T_{2_2} = 24$	$W_1 = 500; W_2 = 190; W_3 = 500$	$r_{2_3 2} = 120$
3	$T_{1_4} = 26$	$W_1 = 500; W_2 = 130; W_3 = 600$	$r_{1_5 1} = 200$
2	$T_{3_2} = 26$	$W_1 = 300; W_2 = 130; W_3 = 600$	$r_{3_3 1} = 200$
1	$T_{2_3} = 36$	$W_1 = 500; W_2 = 400; W_3 = 1\ 000$	$r_{2_4 2} = 90$
0	4 个地震灾害点的所有伤员都运至医院, 结束调运		
$\min T = T_{2_3} + t_{2_4 2} = 36 + 6 = 42$			

表 5 不考虑医院伤员流动的初始数据
Tab.5 Initial data of hospitals ignoring wounded's flow

X_i	G_i	A_i	t_{ij}				
			$B_1(Y_1 = 500)$	$B_2(Y_2 = 400)$	$B_3(Y_3 = 1\ 000)$	$B_4(Y_4 = 500)$	$B_5(Y_5 = 1\ 200)$
$X_1 = 1\ 000$	$G_1 = 200$	A_1	4	3	5	8	9
$X_2 = 450$	$G_2 = 120$	A_2	8	6	9	10	11
$X_3 = 800$	$G_3 = 300$	A_3	5	6	8	10	9
$X_4 = 1\ 200$	$G_4 = 400$	A_4	6	4	4	8	10

图 2 是将考虑和不考虑伤员流动的两种不同计算过程进行汇总的一张对比图,横轴 n 表示第 n 次调运,两种算法都需要 15 次调运,纵轴 T 对应每次调运后伤员到达医院的时间,其计算方式为 $T = T_{i_k} + t_{i_k j}$.图 2 中的信息显示,在前 6 次调运中,两种方法所达到的效果相同,但是,随着调运的继续进行,由于不考虑伤员流动情况下的医院的容量达到上限后不能继续参与调度,模型中必须加入新的相对更远的医院参与救援,导致调运时间变长,即救援效果变差.

在仿真案例中,共 4 个地震灾害点 3 450 个伤员在有道路运输能力约束和医院救治容量约束的情

在不考虑伤员流动的调度模型中,同样进行了 15 次调运,前 10 次调运, $m = 4$,即 4 个灾害点都在参与调度.在 $T_{4_2} = 16$ 时,进行对 A_4 的第 3 次调运,此后 A_4 不再参与调运,第 11,12 次调度时, $m = 3$,在 $T_{3_2} = 24$ 时进行对 A_3 的第 3 次调运,此后 A_3 不再参与调运,第 13,14 次调运, $m = 2$,在 $T_{1_4} = 42$ 时进行对 A_1 的第 5 次调运,此后 A_1 不再参与调运,第 15 次调运时, $m = 1$,即只有 1 个灾害点参与调运,在 $T_{2_3} = 44$ 时进行对 A_2 的第 4 次调运,此后所有伤员运送至医院,整个调度系统结束调运,整个调度过程的总用时为 $\min T = T_{2_3} + t_{2_4 5} = 44 + 10 = 54$. 因为,不考虑伤员流动,在第 4 次调运后,医院 B_2 的剩余可用容量 $W_2 = 80$,不再满足参与救援调度的条件.在第 5 次调运后,医院 B_1 的剩余可用容量 $W_1 = 0$,不再满足参与救援调度的条件.在第 9 次调运后,医院 B_3 的剩余可用容量 $W_3 = 0$,不再满足参与救援调度的条件.在第 10 次调运后,医院 B_5 的剩余可用容量 $W_5 = 100$,不再满足参与救援调度的条件.在第 13 次调运后,医院 B_4 的剩余可用容量 $W_4 = 60$,不再满足参与救援调度的条件.

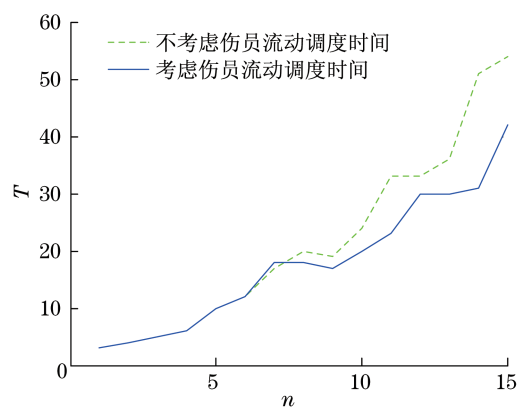


图 2 两种算法计算过程汇总图
Fig.2 Summary of the two calculations

况下用时 42 个时间单位被全部运输至医院进行抢救,参与救治的有 3 所医院.在不考虑医院内伤员流动的情况下,所有医院的容量总和必定大于 3 450,所以,另有 3 个更远的医院参与到应急救援中,此时所有医院的容量之和为 4 200,相对于考虑伤员流动的模型来说,浪费了大量的医院资源,更为严重的是拖延了救治时间,所有伤员要经过 54 个时间单位才能全部运至医院进行救治,比考虑医院内伤员流动的模型要延误 12 个时间单位.

4 结 论

研究了地震发生后伤员运输至医院进行救治的问题,分单灾害点多医院和多灾害点多医院进行建模和仿真.在模型的构建中考虑了道路的运输能力约束和医院容量约束,模型中集合了伤员流动的思想,使研究更符合实际情况,并在算例的验证中将未考虑伤员流动情况的计算结果与考虑伤员流动情况的计算结果进行对比,体现伤员流动在模型建立中的重要性.这对突发事件应急调度的动态分析具有重要意义.在进一步的研究中,还需要针对模型的特点开发具有更高计算性能的求解算法,来解决更加复杂的伤员运输模型.

参考文献:

- [1] LARSON R C, METZGER M D, CAHN M F. Responding to emergencies: lessons learned and the need for analysis[J]. *Interfaces*, 2006, 36(6): 486 – 501.
- [2] SIMPSON N C, HANCOCK P G. Fifty years of operational research and emergency response [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2009, 60(S1): S126 – S139.
- [3] 姜艳萍,樊治平,苏明明. 应急决策方案的动态调整方法研究[J]. *中国管理科学*, 2011, 19(5): 104 – 108.
- [4] ÖZDAMAR L, EKINCI E, KÜÇÜKYAZICI B. Emergency logistics planning in natural disasters[J]. *Annals of Operations Research*, 2004, 129(1/4): 217 – 245.
- [5] HAGHANI A, OH S C. Formulation and solution of a multi-commodity, multi-modal network flow model for disaster relief operations[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 1996, 30(3): 231 – 250.
- [6] FIEDRICH F, GEHBAUER F, RICKERS U. Optimized resource allocation for emergency response after earthquake disasters[J]. *Safety Science*, 2000, 35(1/3): 41 – 57.
- [7] JAE Y. Stochastic scheduling problems for minimizing tardy jobs with application to emergency vehicle dispatching on unreliable road networks [D]. New York: University of New York, 2003.
- [8] BARBAROSO ĞLU G, ÖZDAMAR L, ÇEVIK A. An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 140(1): 118 – 133.
- [9] JAGTENBERG C J, VAN DEN BERG P L, VAN DER MEI R D. Benchmarking online dispatch algorithms for Emergency Medical Services[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 258(2): 715 – 725.
- [10] WILMER I, CHALK G, DAVIES G E, et al. Air ambulance tasking: mechanism of injury, telephone interrogation or ambulance crew assessment? [J]. *Emergency Medicine Journal*, 2015, 32(10): 813 – 816.
- [11] CLARK A, CULKIN B. A network transshipment model for planning humanitarian relief operations after a natural disaster[M]//VITORIANO B, MONTERO J, RUAN D. *Decision Aid Models for Disaster Management and Emergencies*. Paris: Atlantis Press, 2013.
- [12] KNIGHT V A, HARPER P R, SMITH L. Ambulance allocation for maximal survival with heterogeneous outcome measures [J]. *Omega*, 2012, 40(6): 918 – 926.
- [13] 刘春林,何建敏,盛昭瀚. 多出救点应急系统最优方案的选取[J]. *管理工程学报*, 2000, 14(1): 13 – 15.
- [14] 潘郁,余佳,达庆利. 基于粒子群算法的连续性消耗应急资源调度[J]. *系统工程学报*, 2007, 22(5): 556 – 560.
- [15] 杨继君,许维胜,黄武军,等. 基于多灾点非合作博弈的资源调度建模与仿真[J]. *计算机应用*, 2008, 28(6): 1620 – 1623.
- [16] 曹庆奎,刘新雨,任向阳. 基于模拟植物生长算法的车辆调度问题[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(6): 1449 – 1456.
- [17] 代颖,马祖军,郑斌. 突发公共事件应急系统中的模糊多目标定位 – 路径问题研究[J]. *管理评论*, 2010, 22(1): 121 – 128.
- [18] 张国富,王永奇,苏兆品,等. 应急救援物资多目标分配与调度问题建模与求解[J]. *控制与决策*, 2017, 32(1): 86 – 92.

(编辑:石 瑛)